

# 催化动力学光度法快速测定卤肉制品中的痕量铬

郭楠楠\*, 王 成

(郑州科技学院食品科学与工程学院, 郑州市食品安全快速检测重点实验室 郑州 450064)

**摘要: 目的** 建立催化动力学光度法快速测定卤肉制品中痕量铬。**方法** 以卤肉制品为样品, 通过单因素试验考察 Cr(VI)-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>-溴甲酚绿催化反应体系中的 pH、过氧化氢用量、溴甲酚绿用量、反应温度和反应时间对体系吸光度的影响, 在最优反应条件下测定卤肉制品中的痕量铬。**结果** 催化动力学光度法测定卤肉制品中痕量铬的最佳波长是 630 nm, 反应体系 pH 4.4, 过氧化氢的用量为 0.2 mL, 溴甲酚绿用量为 0.4 mL, 在 60 °C 水浴中加热 5 min。该方法检出限为 0.256 μg/mL, 平均加标回收率为 88.5%~106.0%, 相对标准偏差为 1.1%~3.0% (n=5)。**结论** 与 GB 5009.123—2014《食品安全国家标准 食品中铬的测定》中的电感耦合等离子体质谱法(inductively coupled plasma-mass spectrometry, ICP-MS)相比, 本研究所建立的方法操作简单, 所用仪器价廉易得、成本低、易于推广。

**关键词:** 催化动力学光度法; 卤肉制品; 铬

## Rapid determination of trace chromium in stewed meat products by catalytic kinetic spectrophotometry

GUO Nan-Nan\*, WANG Cheng

(College of food Science and Engineering, Zhengzhou University of Science and Technology, Zhengzhou Rapid Detection Technology of Food Safety Laboratory, Zhengzhou 450064, China)

**ABSTRACT: Objective** To establish a method for the rapid determination of trace chromium in stewed meat products by catalytic kinetic spectrophotometry. **Methods** Taking stewed meat products as samples, the effects of pH, hydrogen peroxide dosage, bromocresol green dosage, reaction temperature and reaction time on the absorbance of Cr(VI)-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> bromocresol green catalytic reaction system were investigated by single factor experiment. The chromium content in the stewed meat products was determined under the optimal reaction conditions. **Results** The optimum conditions were as follows: Wavelength 630 nm, pH 4.4, 0.2 mL hydrogen peroxide, 0.4 mL bromocresol green, 60 °C water bath heating for 5 min. The limit of detection was 0.256 μg/mL, and the average recoveries were 88.5%–106.0% with the relative standard deviations in the range of 1.1%–3.0% (n=5). **Conclusion** Compared with the inductively coupled plasma-mass spectrometry (ICP-MS) in the GB 5009.123—2014 *National standard for food safety-Determination of chromium in food*, the method established in this study is simple to operate, the instrument used is cheap and easy to obtain, low cost and easy to promote.

**KEY WORDS:** catalytic kinetic spectrophotometry; stewed meat products; chromium

基金项目: 河南省高等学校重点科研项目(21B550008)

Fund: Supported by the Department of Education of Henan Province (21B550008)

\*通信作者: 郭楠楠, 硕士, 副教授, 主要研究方向为食品安全快速检测分析新技术。E-mail: 421770946@qq.com

\*Corresponding author: GUO Nan-Nan, Master, Associate Professor, Zhengzhou University of Science and Technology Zhengzhou Rapid Detection Technology of Food Safety Laboratory, Zhengzhou 450064, China. E-mail: 421770946@qq.com

## 0 引言

三价铬是人体必需的微量元素,可促进人体的生长发育,然而六价铬是有毒元素,可诱发基因突变,体内积累过多会引发多种癌症,因此被公认为致癌物<sup>[1]</sup>。随着检测分析技术的提高,铬含量检测方法也越来越趋于简单而精确,GB 5009.123—2014《食品安全国家标准 食品中铬的测定》中痕量铬的测定方法为石墨炉原子吸收法、电感耦合等离子体质谱法(inductively coupled plasma-mass spectrometry, ICP-MS)等<sup>[2-4]</sup>,以上方法均需要大型精密仪器,操作较为复杂,需要专门的培训。催化动力学光度法通过建立合适的催化体系,使用较为简单的分光光度计即可进行测定,操作较为方便。目前,催化动力学测定痕量铬在水处理方面的研究较多<sup>[5-8]</sup>,在食品中铬含量检测中的应用较为少见<sup>[9-12]</sup>,且检测时所选反应体系较为复杂,且在进行方法对比时所采用的国家标准较为陈旧<sup>[13-18]</sup>,无法提现催化动力学法的优势。本研究探讨和优化了催化动力学光度法测定卤肉制品中痕量铬的动力学条件,以期食品中铬含量的快速测定提供一种操作简便、成本低的方法。

## 1 材料和方法

### 1.1 仪器与设备

SYG-1220 恒温水浴箱(苏州捷美电子有限公司);WF-003 电热鼓风干燥箱(山东维诺医药设备制造有限公司);UV-4802 紫外可见分光光度计(郑州南北仪器设备有限公司);DB-2EFS 电热板(上海坤天试验仪器有限公司);iCAPQ 电感耦合等离子体质谱仪(赛默飞世尔科技有限公司);MARS 微波消解仪(美国培安有限公司);XPR205DR 分析天平[梅特勒-托利多仪器(上海)有限公司]。

### 1.2 材料与试剂

烤鸭、卤鸡、卤猪头肉、卤兔腿、卤牛肉等卤肉制品(河南省安必诺检测公司提供)。

铬标准溶液[1000 mg/mL, 成都化夏化学试剂有限公司(北京公司)];溴甲酚绿、亮绿、甲基红、茜素红、苯酚红(分析纯, 郑州派尼化学试剂厂);30%过氧化氢(分析纯, 郑州慧泽生化科技有限公司);浓硝酸(分析纯, 淮南市友友化工有限公司);无水醋酸钠(分析纯, 郑州世纪凯美化工产品有限公司);冰醋酸(分析纯, 连云港嘉一化工有限公司)。

### 1.3 试验方法

#### 1.3.1 样品的处理

参考 GB 5009.123—2014, 采用微波消解处理样品, 用分析天平称取 0.5 g 左右的样品消解后, 转入 25 mL 比色管中, 加水定容振荡摇匀即可。

#### 1.3.2 样品中痕量铬的测定

取一只比色管, 依次加入 5 mL pH 4.4 醋酸-醋酸钠缓冲溶液、0.2 mL 过氧化氢溶液、0.4 mL 溴甲酚绿溶液, 再加蒸馏水稀释定容至 25 mL, 反应结束后测定吸光度值, 记为  $A_1$ 。然后取 5.00 mL 的样品消化液于 25 mL 的比色管中, 加入与上只比色管相同溶液, 振荡并混合均匀后置于 60 °C 的恒温水浴锅中加热 5 min, 取出放入冷水中冷却至室温, 测定样品溶液的具体吸光值, 记为  $A_2$ ,  $\Delta A$  即为  $A_1 - A_2$ 。样品中铬含量的计算见公式(1)。

$$X = \frac{C \times 25 \times V_2}{V_1 \times m} \quad (1)$$

式中:  $X$  为试样中铬含量, mg/kg;  $C$  为消解后试样中铬的质量浓度,  $\mu\text{g/mL}$ ; 25 为消解液定容体积, mL;  $V_1$  为所取样品的体积, mL;  $V_2$  为消解后样品的定容体积, mL;  $m$  为称取样品的质量, g。

#### 1.3.3 正交试验设计

在单因素试验结果的基础上, 选择溴甲酚绿作为色素, 波长 630 nm, 在 60 °C 水浴中加热 5 min, 选择 pH ( $A$ )、溴甲酚绿用量( $B$ )、过氧化氢用量( $C$ )、反应温度( $D$ ) 4 个因素设计  $L_9(3^4)$  正交试验, 因素水平见表 1。

表 1 因素水平表  
Table 1 Factor level table

水平	因素			
	$A$ pH	$B$ 溴甲酚绿用量 /mL	$C$ 过氧化氢用量 /mL	$D$ 反应温度 /°C
1	3.8	0.4	0.1	55
2	4.4	0.6	0.2	60
3	5.0	0.8	0.5	70

## 2 结果与分析

### 2.1 色素的选择

在催化体系中, 选择合适的色素有助于我们观察褪色效果, 色素的种类不同, 对催化反应的反映效果不同。本研究选取茜素红、苯酚红、甲基红、溴甲酚绿、亮绿 5 种色素<sup>[2-8]</sup>, 取 10 支比色管, 平均分为 2 组, 一组催化体系, 另一组非催化体系, 在催化体系中分别加入 1.2 mL 铬标准溶液, 按照 1.3.2 操作, 分别测定催化体系和非催化体系的吸光度值, 并计算  $\Delta A$ ,  $\Delta A$  越大, 结果越好, 具体结果见表 2。结果表明, 在其他试验条件不变的前提下, 溴甲酚绿反应体系的  $\Delta A$  最大, 因此选择溴甲酚绿作为催化体系色素。

表 2 5 种色素反应体系的吸光度结果( $n=4$ )  
Table 2 Absorbance results of 5 kinds of pigments reaction systems ( $n=4$ )

色素种类	茜素红	苯酚红	甲基红	溴甲酚绿	亮绿
非催化 $A_1$	0.289	0.287	0.038	0.211	0.260
催化 $A_2$	0.291	0.264	0.034	0.142	0.234
$\Delta A$	-0.002	0.023	0.004	0.069	0.026

## 2.2 波长的选择

选取的 5 个吸收波长分别为 540、570、600、630、640 nm。取 2 支 25 mL 比色管。其中一支作为催化体系, 加入 1.2 mL 的铬标准溶液, 另一支不加铬标准溶液, 作为非催化体系, 再按顺序分别在 2 支试管中加入 5 mL pH 4.4 醋酸-醋酸钠缓冲溶液、0.4 mL 溴甲酚绿溶液、0.2 mL 过氧化氢溶液, 加入蒸馏水定容至刻度线, 混合均匀, 在不同波长下测定吸光度, 计算  $\Delta A$  值, 具体结果见表 3。结果显示, 催化体系和非催化体系均在 630 nm 处有最大吸收, 且在 630 nm 处  $\Delta A$  值最大, 因此选取最大吸收波长为 630 nm。

表 3 反应体系在不同波长的吸光度结果( $n=4$ )  
Table 3 Absorbance results of the reaction systems under different wavelengths ( $n=4$ )

波长/nm	540	570	600	630	640
非催化 $A_1$	0.457	0.818	1.294	1.295	1.014
催化 $A_2$	0.438	0.777	1.230	1.230	0.960
$\Delta A$	0.019	0.041	0.064	0.065	0.054

## 2.3 pH 的选择

酸度对催化反应体系的影响很大, 酸度太大会导致溶液反应体系不稳定, 酸度太小又不利于铬元素的测定。取 10 支 25 mL 比色管, 5 支用于催化体系, 5 支用于非催化体系, 在催化体系的 5 支比色管中各加入 1.2 mL 铬标准使用液、0.4 mL 溴甲酚绿溶液、0.2 mL 过氧化氢溶液, 再向 10 支比色管中分别加入醋酸-醋酸钠缓冲溶液, 调整反应体系的 pH 为 3.2、3.8、4.4、5.0、5.6, 加入水定容至 25 mL, 计算  $\Delta A$ , 具体结果见表 4。结果显示, pH 在 4.4 的时, 吸光度最大,  $\Delta A$  最大, 所以本试验选择的 pH 是 4.4。

表 4 不同 pH 的反应体系吸光度结果( $n=4$ )  
Table 4 Absorbance results of the reaction systems under different pH ( $n=4$ )

pH	3.2	3.8	4.4	5.0	5.6
非催化 $A_1$	0.035	0.155	0.912	0.687	1.110
催化 $A_2$	0.030	0.146	0.891	0.669	1.102
$\Delta A$	0.005	0.009	0.021	0.018	0.008

## 2.4 溴甲酚绿用量的选择

取 10 支 25 mL 的具塞比色管, 5 支用于催化体系, 5 支用于非催化体系, 催化体系中分别加入 1.2 mL 铬标准溶液, 再分别向 10 支比色管中加入 5 mL 醋酸-醋酸钠缓冲溶液, 再分别加入溴甲酚绿溶液 0.2、0.4、0.6、0.8、1.0、1.2 mL, 再各加入 0.2 mL 过氧化氢溶液, 加水定容至 25 mL, 计算  $\Delta A$ , 具体结果见表 5。结果显示, 随着溴甲酚绿用量的增加,  $\Delta A$  呈先增后降的趋势, 溴甲酚绿用量为 0.4 mL,  $\Delta A$  最大, 故选择溴甲酚绿的用量为 0.4 mL。

表 5 溴甲酚绿用量对吸光度的影响( $n=4$ )  
Table 5 Effects of bromocresol green dosages on absorbance ( $n=4$ )

体积/mL	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0	1.2
非催化 $A_1$	0.211	0.231	0.358	0.510	0.573	0.727
催化 $A_2$	0.209	0.222	0.352	0.505	0.570	0.725
$\Delta A$	0.002	0.009	0.006	0.005	0.003	0.002

## 2.5 过氧化氢用量的选择

取 10 支 25 mL 具塞比色管, 5 支用于催化体系, 5 支用于非催化体系, 催化体系中分别加入 1.2 mL 铬标准溶液, 再向 10 支比色管中分别加入 5 mL 缓冲溶液, 0.4 mL 溴甲酚绿溶液, 依次加入 0.1、0.2、0.5、1.0、3.0、5.0 mL 过氧化氢, 加入水定容至 25 mL, 计算  $\Delta A$ , 结果见表 6。结果显示, 过氧化氢的加入量对  $\Delta A$  影响较大, 过氧化氢用量为 0.2 mL 时,  $\Delta A$  最大, 故选择过氧化氢用量为 0.2 mL。

表 6 过氧化氢用量对吸光度的影响( $n=4$ )  
Table 6 Effects of hydrogen peroxide dosages on absorbance ( $n=4$ )

体积/mL	0.1	0.2	0.5	1.0	3.0	5.0
非催化 $A_1$	0.594	0.603	0.581	0.587	0.586	0.583
催化 $A_2$	0.576	0.575	0.573	0.564	0.564	0.567
$\Delta A$	0.018	0.028	0.008	0.023	0.022	0.016

## 2.6 铬标液用量的选择

取 6 支比色管, 向其中 5 支依次加入铬标准溶液分别为 0.8、1.2、1.6、2.0、2.4 mL, 再向 6 支比色管中依次加入 5 mL pH 4.4 醋酸-醋酸钠缓冲溶液, 溴甲酚绿 0.4 mL, 过氧化氢 0.2 mL, 加水定容至 25 mL, 轻轻摇动使其混合均匀。计算  $\Delta A$  值, 结果见表 7。结果显示, 随着铬标液用量的增加,  $\Delta A$  呈现先增后降的趋势,  $\Delta A$  在 1.2 mL 时最大, 所以选择铬标液的用量为 1.2 mL。

表 7 铬标液用量对吸光度的影响( $n=4$ )Table 7 Effects of amount of chromium standard solutions on absorbance ( $n=4$ )

体积/mL	0.8	1.2	1.6	2.0	2.4
非催化 $A_1$	0.185	0.186	0.176	0.184	0.177
催化 $A_2$	0.175	0.173	0.175	0.177	0.177
$\Delta A$	0.010	0.013	0.001	0.007	0.000

## 2.7 反应温度的选择

当 pH 为 4.4, 过氧化氢的用量为 0.2 mL, 溴甲酚绿的用量为 0.4 mL, 加水定容至 25 mL, 反应时间为 5 min 时, 体系分别在 25、40、55、60、70 °C 进行反应。计算  $\Delta A$  值, 具体结果见表 8。由表 8 可以看出, 随着反应温度的升高,  $\Delta A$  的值也在不断的升高, 在 60 °C 时到达顶峰, 因此得出结论, 该试验在 25 °C 下几乎没有任何变化, 其最佳反应温度在 60 °C 左右。

表 8 温度对吸光度的影响( $n=4$ )Table 8 Effects of reaction temperatures on absorbance ( $n=4$ )

温度/°C	25	40	55	60	70
非催化 $A_1$	0.179	0.180	0.179	0.268	0.226
催化 $A_2$	0.181	0.180	0.179	0.260	0.223
$\Delta A$	-0.002	0.000	0.000	0.008	0.003

## 2.8 反应时间的选择

当 pH 为 4.4, 过氧化氢的用量为 0.2 mL, 溴甲酚绿的用量为 0.4 mL, 反应温度为 60 °C, 分别加热 3、5、10、15、20、25 min, 取出之后放入冷水中冷却至室温。计算  $\Delta A$  的值, 具体结果见表 9。由表可以看出  $\Delta A$  值随水浴时间的增加而不断减小, 水浴时间为 5 min 时,  $\Delta A$  最大, 因此选择反应时间为 5 min。

表 9 反应时间对吸光度的影响( $n=4$ )Table 9 Effects of reaction time on absorbance ( $n=4$ )

时间/min	3	5	10	15	20	25
非催化 $A_1$	0.261	0.268	0.264	0.259	0.260	0.261
催化 $A_2$	0.260	0.261	0.277	0.273	0.277	0.277
$\Delta A$	0.001	0.007	-0.013	-0.014	-0.017	-0.016

## 2.9 正交试验设计

从表 10 正交试验结果可以看出, 影响  $\Delta A$  的 4 个因素的主次顺序为 pH ( $A$ ) > 铬标液用量( $D$ ) > 溴甲酚绿用量( $B$ ) > 过氧化氢用量( $C$ ), 最佳试验条件为  $A_2B_1C_2D_3$ , 与单因素

试验结果的最佳  $A_2B_1C_2D_2$  不相符合, 因此需要验证试验, 经验证试验对比后发现, 在其他条件不变的情况下, 使用单因素最佳  $A_2B_1C_2D_2$  所测得的  $\Delta A$  值大于  $A_2B_1C_2D_3$ , 故最后选定试验条件为  $A_2B_1C_2D_2$ 。

## 2.10 工作曲线

确定反应所需的最佳条件后, 在其他条件不变的情况下, 改变铬标准溶液的使用量, 取 6 支 25 mL 的具塞比色管, 依次加入 0、0.5、1、1.5、2、2.5 mL 的铬标准使用液。得工作曲线方程  $\Delta A=0.0943C-0.0038$ , 其中  $r=0.9913$ 。

## 2.11 加标回收率

待测样液中分别加 0.2  $\mu\text{g}$  铬标准样液, 测定其吸光度, 计算其回收率, 具体结果见表 11。

表 10 正交试验结果

Table 10 Results of orthogonal test

试验号	$A$ pH	$B$ 溴甲酚绿用量/mL	$C$ 过氧化氢用量/mL	$D$ 反应温度/°C	$\Delta A$
1	1	1	1	1	0.005
2	1	2	2	2	0.008
3	1	3	3	3	0.011
4	2	1	2	3	0.029
5	2	2	3	1	0.020
6	2	3	1	2	0.007
7	3	1	3	2	0.005
8	3	2	1	3	0.014
9	3	3	2	1	0.003
$K_1$	0.024	0.039	0.026	0.028	
$K_2$	0.056	0.042	0.040	0.023	
$K_3$	0.022	0.021	0.036	0.054	
$k_1$	0.008	0.013	0.009	0.009	
$k_2$	0.019	0.014	0.013	0.008	
$k_3$	0.007	0.007	0.003	0.018	
$R$	0.032	0.021	0.014	0.026	

表 11 平均加标回收率( $n=4$ )Table 11 Average spiked recoveries ( $n=4$ )

样品	加标前/( $\mu\text{g/mL}$ )	加标后/( $\mu\text{g/mL}$ )	回收率/%	相对标准偏差/%
烤鸭	0.021	0.211	95.0	1.4
卤鸡	0.014	0.197	91.5	2.2
卤猪头肉	0.020	0.232	106.0	1.9
卤兔腿	0.009	0.186	88.5	3.0
卤牛肉	0.051	0.239	94.0	1.1

结合表 11 可知, 该方法回收率在 88.5%~106.0%之间, 符合 GB/T 27404—2008《试验室质量控制规范 食品理化检测》中的相关规定。

## 2.12 检出限及定量限

对样品空白进行 11 次平行测定, 计算标准偏差, 以 3 倍标准偏差<sup>[20]</sup>对应的质量浓度为检出限, 以 10 倍标准偏差对应的质量浓度为定量限, 催化动力学光度法的检出限为 0.256  $\mu\text{g/mL}$ , 定量限为 0.853  $\mu\text{g/mL}$ 。

## 2.13 样品结果分析

催化动力学反应体系的 pH 为 4.4, 过氧化氢的用量为 0.2 mL, 溴甲酚绿的用量为 0.4 mL, 在 60  $^{\circ}\text{C}$  水浴中加

热 5 min, 于波长 630 nm 检测吸光度。分别检测不同卤肉制品中铬含量, 结果见上表 12。本试验所选各卤肉制品中铬含量均未超过国家标准中铬的限量(1 mg/kg)。

## 2.14 催化动力学光度法与 ICP-MS 法测定结果比较

取烤鸭、卤鸡、卤猪头肉、卤兔腿、卤牛肉, 在相同的消化条件下, 分别使用优化后的催化动力学光度法和 GB 5009.268—2016 中 ICP-MS 进行 5 次平行测定, 检测方法的准确度和精密度, 结果的相对标准偏差(relative standard deviation, RSD)在 5.8%~11.7%之间, 符合误差允许范围。对 2 种方法进行  $F$  检验<sup>[19]</sup>, 所得  $F$  值均小于  $F_{表}$  ( $F_{表}=5.05, \alpha=0.05$ ), 说明 2 种方法在精密度上不存在显著性差异。具体结果见表 12。

表 12 催化动力学光度法与 ICP-MS 法的测定结果( $n=5$ )  
Table 12 Results of catalytic kinetic spectrophotometry and ICP-MS ( $n=5$ )

样品	催化光度法			ICP-MS 法			
	样品中铬含量平均值/(mg/kg)	SD/%	RSD/%	样品中铬含量平均值/(mg/kg)	SD/%	RSD/%	$F$ 值
烤鸭	0.272	2.2	8.1	0.262	2.7	10.3	1.5
卤鸡	0.170	2.0	11.7	0.176	2.1	11.9	1.1
卤猪头肉	0.250	2.5	10.0	0.290	1.6	5.5	2.4
卤兔腿	0.164	1.5	9.1	0.164	2.1	12.8	2.0
卤牛肉	0.604	3.5	5.8	0.642	4.0	6.2	1.3

注: SD (standard deviation)为标准偏差。

## 3 结 论

本研究所建立的催化动力学光度法测定卤肉制品中痕量铬的最佳波长是 630 nm, 反应体系 pH 4.4, 过氧化氢的用量为 0.2 mL, 溴甲酚绿用量为 0.4 mL, 在 60  $^{\circ}\text{C}$  水浴中加热 5 min。该方法检出限为 0.256  $\mu\text{g/mL}$ , 平均回收率在 88.5%~106.0%之间, 相对标准偏差在 1.1%~3.0%之间, 与国家标准中的 ICP-MS 相比, 在精密度上不存在显著性差异, 但本方法操作简单, 体系建立之后使用普通分光光度计即可操作, 不需要专门的培训, 所用仪器价廉易得, 成本花费较少, 易于推广。

## 参考文献

- [1] 靳红果, 吕欣, 李乐, 等. 微波消解电感耦合等离子体质谱法测定肉与肉制品中 6 种重金属元素[J]. 肉类研究, 2015, 29(4): 31-34.  
JIN HG, LV X, LI L, *et al.* Determination of 6 heavy metals in meat and meat products by inductively coupled plasma-mass spectrometry after microwave digestion [J]. Meat Res, 2015, 29(4): 31-34.
- [2] 朱有涛, 张遐, 邵梅, 等. 微波消解 ICP-MS 法检测肉制品中的铅、铬、镉、铝、锰、锡[J]. 食品研究与开发, 2018, 39(14): 172-176.  
ZHU YT, ZHANG X, SHAO M, *et al.* Simultaneous determination of 7 trace elements in meat and meat products by inductively coupled plasma

mass spectrometry (ICP-MS) with microwave digestion [J]. Food Res Dev, 2018, 39(14): 172-176

- [3] 王祎娟, 段虎, 路志轩, 等. 肉制品中钠含量的检测方法研究[J]. 肉类工业, 2019, 3(1): 39-42.  
WANG YJ, DUAN H, LU ZX, *et al.* Study on the detection method of sodium content in meat product [J]. Meat Ind, 2019, 3(1): 39-42.
- [4] 吴春敏, 夏静, 李强, 等. 微波消解-电感耦合等离子体质谱法同时测定肉及肉制品中 7 种痕量元素[J]. 肉类研究, 2015, 29(3): 27-29.  
WU CM, XIA J, LI Q, *et al.* Simultaneous determination of 7 trace elements in meat and meat products by inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS) with microwave digestion [J]. Meat Res, 2015, 29(3): 27-29.
- [5] 朱化雨, 杨秀英, 谭继承. 催化动力学光度法测定水中痕量铬(VI)[J]. 山东师大学报(自然科学版), 1994, (1): 55-58.  
ZHU HY, YANG XY, TAN JC. Determination of trace chromium (VI) in water by catalytic kinetic method [J]. J Shandong Norm Univ (Nat Sci Ed), 1994, (1): 55-58.
- [6] 赵桦萍. 催化动力学光度法测定工业废水中的 Cr(VI)[J]. 化工环保, 2016, 36(3): 345-349.  
ZHAO HP. Determination of Cr(VI) in industrial wastewater by catalytic kinetic spectrophotometry [J]. Environ Prot Chem Ind, 2016, 36(3): 345-349.
- [7] XIA SP, SONG ZL, JEYAKUMAR P. A critical review on bioremediation technologies for Cr (VI)-contaminated soils and wastewater [J]. Crit Rev

- Environ Sci Technol, 2019, 49(12): 1027–1078.
- [8] 周倩倩, 姬泓巍, 徐真真, 等. 水体中痕量铬(VI)的催化动力学测定方法研究及应用[J]. 中国海洋大学学报, 2015, 45(10): 56–63.  
ZHOU QQ, JI HW, XU ZZ, *et al.* Study and application of determination of trace chromium (VI) in water by the catalytic kinetic spectrophotometry method [J]. J China Ocean Univ, 2015, 45(10): 56–63.
- [9] 张皓爽, 姬泓巍, 宰敬喆, 等. 过氧化氢-茜素红 s 体系催化动力学分光光度法测量痕量钴(II)[J]. 中国海洋大学学报, 2017, 47(11): 61–69.  
ZHANG HS, JI HW, ZAI JZ, *et al.* Catalytic kinetic determination of trace cobalt (II) based on oxidation of alizarin red s by hydrogen peroxide [J]. J China Ocean Univ, 2017, 47(11): 61–69.
- [10] 开小明, 徐伟, 吴健, 等. 碘酸钾-酸性铬蓝 K 催化动力学光度法测定人发中微量铁[J]. 广州化工, 2019, 47(6): 101–102.  
KAI XM, XU W, WU J, *et al.* Determination of microamount iron of human hair by catalytic kinetic spectrophotometry with potassium iodate oxidation acidic chromium blue K [J]. Guangzhou Chem Ind, 2019, 47(6): 101–102.
- [11] 韩虹, 韩星, 苏天鹅. 催化动力学光度法测定水果中的痕量铁[J]. 广州化工, 2015, 43(11): 129–130.  
HAN H, HAN X, SU TE. Determination of trace iron in fruit using catalytic kinetic spectrophotometry [J]. Guangzhou Chem Ind, 2015, 43(11): 129–130.
- [12] 杨慧, 刘俊华, 丁良, 等. 催化动力学分光光度法测定粉丝中的微量铬[J]. 食品研究与开发, 2014, 35(6): 75–78.  
YANG H, LIU JH, DING L *et al.* Catalytic kinetic spectrophotometric method for determination of trace chromium (VI) in vermicelli [J]. Food Res Dev, 2014, 35(6): 75–78.
- [13] 沈淑君, 邹小勇. 茜素红-十六烷基三甲基溴化铵催化动力学光度法测定痕量铬(VI)[J]. 冶金分析, 2013, 33(12): 47–51.  
SHEN SJ, ZOU XY. Determination of trace chromium (VI) by catalytic kinetic spectrophotometry with alizarin red-cetyltrimethyl ammonium bromide system [J]. Metall Anal, 2013, 33(12): 47–51.
- [14] 罗到成, 罗铸. Cr(VI)-亚甲基蓝-KBrO<sub>3</sub> 体系催化光度法测定赤泥样品中痕量 Cr(VI)[J]. 分析科学学报, 2018, 34(2): 245–248  
LUO DC, LUO Z. Catalytic spectrophotometric determination of trace Cr (VI) from red mud using Cr (VI)-methylene blue-potassium bromate system [J]. J Anal Sci, 2018, 34(2): 245–248.
- [15] 李玉红. 催化动力学荧光光度法测定铬(VI)[J]. 理化检验-化学分册, 2014, 50(7): 857–859.  
LI YH. Catalytic kinetic fluorophotometric determination of chromium (VI) [J]. Phys Test Chem Anal Part B, 2014, 50(7): 857–859.
- [16] 尚昊, 郝连生, 刘金秋, 等. TiO<sub>2</sub> 还原 Cr(VI) 的光催化反应及其反应动力学研究[J]. 青岛理工大学学报, 2018, 39(5): 91–95.  
SHANG H, HAO LS, LIU JQ, *et al.* Photocatalytic reduction for Cr (VI) with TiO<sub>2</sub> and kinetic [J]. J Qingdao Univ Technol, 2018, 39(5): 91–95.
- [17] PARLAYICI E, PEHLIVAN E. Comparative study of Cr (VI) removal by bio-waste adsorbents: Equilibrium, kinetics, and thermodynamic [J]. J Anal Sci Technol, 2019, 10(5): 1–8.
- [18] 张爱英, 朱庆仁. 双波长双指示剂催化动力学分光光度法测定水中的痕量铬[J]. 光谱实验室, 2013, 30(1): 124–128.  
ZHANG AIY, ZHU QR. Determination of trace chromium in water by dual-wavelength and dual-indicator catalytic kinetic spectrophotometry [J]. Chin J Spectrosc Lab, 2013, 30(1): 124–128.
- [19] 高向阳. 现代食品分析(第二版)[M]. 北京: 科学出版社, 2018.  
GAO XY. Modern food analysis (second edition) [M]. Beijing: Science Press, 2018.
- [20] 高向阳. 原子荧光双标准夹心法快速测定食品中的汞[J]. 食品安全质量检测学报, 2021, 12(2): 535–539.  
GAO XY. Rapid determination of mercury in food by atomic fluorescence with double standard sandwich method [J]. J Food Saf Qual, 2021, 12(2): 535–539.

(责任编辑: 郑丽于梦娇)

## 作者简介



郭楠楠, 硕士, 副教授, 主要研究方向为食品安全快速检测分析新技术。  
E-mail: 421770946@qq.com